RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

Sistemi integrati: Standardizzazione di test prestazionali in condizioni dinamiche di impianti integrati (LA4.8)

G.L. Morini, M. Dongellini, C. Naldi, T.P.E. Randazzo

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

RdS_PTR 22-24_PR1.7_LA4.8_397

Sistemi integrati: Standardizzazione di test prestazionali in condizioni dinamiche di impianti integrati

Sistemi integrati: Standardizzazione di test prestazionali in condizioni dinamiche di impianti integrati (LA4.8)

G.L. Morini, M. Dongellini, C. Naldi, T.P.E. Randazzo (Alma Mater Studiorum – Università di Bologna)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 4.8

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Raniero Trinchieri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Gian Luca Morini, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Mese inizio previsto: dicembre 2022

Mese inizio effettivo: dicembre 2022

Mese fine previsto: dicembre 2024

Mese fine effettivo: dicembre 2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Standardizzazione di test dinamici di impianti integrati e sviluppo di logiche di controllo avanzate per lo sbrinamento di pompe di calore ad aria con l'uso di frosting map dedicate.

Indice

1 Risultati attesi 4
2 Risultati ottenuti 5
3 Prodotti attesi 8
4 Prodotti sviluppati 9
5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati 10
6 Sintesi delle attività svolte 11
7 Dettaglio delle attività svolte 12
8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte 18
9 Pubblicazioni scientifiche 19
10 Eventi di disseminazione 20

Indice delle figure

Figura 1 – Andamento orario della temperatura esterna e profilo di potenza termica durante il 9 dicembre 6

Figura 2 – Schematizzazione sistema HiL 12

Figura 3 – Schema idraulico del banco di prova sperimentale 12

Figura 4 – Schematizzazione camera climatica. Fonte: Dongellini *et al.*, 2024 13

Figura 5 – Esempio di risultati del processo di clusterizzazione 3D attraverso codice Matlab: caratterizzazione dei dati climatici di Roma (a) e individuazione delle giornate rappresentative (b) 16

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Dati climatici, carichi termici e elementi di ciascun cluster 6

Tabella 2 – Confronto tra prestazioni giornaliere reali e prestazioni giornaliere simulate (giorno 9 dicembre) 7

Tabella 3 – Confronto tra prestazioni stagionali reali e simulate 7

1 Risultati attesi

L'obiettivo della LA4.8 è proporre linee guida per l'esecuzione di test sperimentali in regime dinamico finalizzati alla verifica delle prestazioni stagionali di sistemi di riscaldamento polivalenti (ovvero ottenuti accoppiando generatori di diversa tipologia: es. pompe di calore a diversa sorgente, caldaie, collettori solari termici, ecc.).

La crescente domanda di riduzione dei consumi di energia primaria non rinnovabile per gli impianti di climatizzazione ha portato alla definizione di nuove tipologie di impianto termico polivalente in cui, combinando diversi generatori e facendoli lavorare in serie e/o in parallelo, si persegue la massimizzazione dello sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili. Attualmente, i costruttori forniscono i dati prestazionali stagionali della singola macchina ipotizzando che il componente venga utilizzato nell'impianto come unico generatore. Questi dati prestazionali non sono sufficienti ai progettisti per prevedere la performance che lo stesso componente fornirà quando inserito in sistemi polivalenti, dove si troverà ad operare assieme ad altri generatori. È quindi spesso impossibile valutare in maniera precisa le prestazioni di un sistema polivalente integrato a partire dai dati di efficienza dei singoli componenti.

L'obiettivo delle presenti linee guida è, quindi, proporsi quale strumento utile alla valutazione delle prestazioni stagionali di impianti polivalenti per mezzo di rapidi test di laboratorio in regime dinamico secondo l'approccio HiL (Hardware-in-the-Loop). Attualmente non esiste infatti alcun protocollo standard per l'esecuzione di test dinamici in laboratori di ricerca atti a tale scopo. Definendo le caratteristiche che deve possedere un apparato sperimentale di tipo HiL per lo svolgimento dei test, le presenti linee guida hanno l'obiettivo di standardizzare e promuovere la realizzazione di impianti di prova di questo tipo all'interno delle principali Università, Centri di Ricerca e costruttori italiani.

2 Risultati ottenuti

Grazie al sistema di controllo sviluppato all'interno del laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna, è stato possibile sviluppare una metodologia di test basata sull'approccio del tipo Hardware-in-the-Loop (HiL), al fine di testare impianti polivalenti ed ottenere le prestazioni di una macchina in differenti condizioni di lavoro. Il banco di prova, accoppiato ad un edificio emulato tramite software, è stato in grado di riprodurre determinate condizioni realistiche di lavoro e verificare le prestazioni di pompe di calore a doppia sorgente in regime dinamico.

In particolare, l'utilizzo dell'apparato sperimentale presente, in abbinamento al software di emulazione dell'edificio, ha permesso:

- l'analisi delle prestazioni reali di una pompa di calore a doppia sorgente (Dual-Source Heat Pump, DSHP) in condizioni di lavoro dinamiche;
- la definizione di test di prova rapidi, avvalendosi del metodo della clusterizzazione, per la stima delle prestazioni stagionali della macchina.

Sono state quindi definite nuove linee guida per valutare le prestazioni di un generatore di calore in regime dinamico, di fondamentale importanza al fine di poter riprodurre test di laboratorio in grado di riprodurre in modo realistico il comportamento dell'impianto. Partendo dalla definizione di una serie di giornate tipo a cui ricondurre le prove di laboratorio, è stata ottenuta un'indicazione delle prestazioni stagionali del sistema combinando i risultati ottenuti dai test su un numero limitato di giornate tipo.

Il sistema basato sul metodo HiL consentirà quindi a Università, Centri di Ricerca e costruttori italiani di valutare le prestazioni stagionali di impianti polivalenti per mezzo di rapidi test di laboratorio in regime dinamico. Inoltre, permetterà di testare innovative logiche di regolazione in grado di rendere gli impianti polivalenti più efficienti. Tali risultati consentiranno a generatori quali pompe di calore elettriche polivalenti una più alta penetrazione di mercato, nonché una maggiore diversificazione delle fonti energetiche impiegate.

Il metodo proposto, applicato per valutare le prestazioni di una pompa di calore dual-source, ha tenuto conto della presenza di transitori durate il funzionamento della macchina, come i cicli on-off. La pompa di calore è stata testata sia in modalità geotermica (macchina acqua-acqua) che in modalità aerotermica (macchina aria-acqua). I test hanno previsto la riproduzione del comportamento dell'impianto durante le differenti giornate tipo. Attraverso il sistema di controllo e di monitoraggio, predisposto in ambiente LabVIEW, è stato possibile ottenere la riproduzione delle condizioni al contorno ricavate dai risultati delle simulazioni dinamiche effettuate tramite il tool ALMABuild (Campana e Morini, 2019). In particolare, l'edificio identificato come oggetto di simulazione è ad uso residenziale ed è caratterizzato da un'unica zona termica che si sviluppa su due piani, con un volume interno di 389,5 m^3 e un'area netta del pavimento pari a 140 m^2. I dettagli dell'edificio selezionato, che è stato considerato ubicato a Roma, sono presenti in Dott *et al.* (2014). Le caratteristiche termofisiche dell'edificio e i dati climatici della località selezionata sono stati inseriti come input delle simulazioni numeriche, da cui sono stati ottenuti gli andamenti stagionali del fabbisogno energetico dell'edificio, della potenza termica erogata dalla pompa di calore (che determina il profilo di accensione e spegnimento da cui è ricavabile la durata delle singole accensioni della macchina) e della temperatura dell'acqua in ingresso alla macchina lato utenza. Grazie al metodo della clusterizzazione è stato possibile selezionare le giornate che sono risultate essere le più caratteristiche del periodo invernale, ovvero 9 dicembre e 7 marzo. In Tabella 1 sono riportati i dati climatici, i carichi termici e il numero di elementi (giornate) di ciascun cluster.

Giornata tipo	9 Dicembre	7 Marzo
Elementi nel cluster	127	39
Temperatura esterna media giornaliera [°C]	10.4	8
Radiazione solare globale giornaliera [Wh m^{-2}]	1830.5	5046.7
Carico termico [kWh]	111.63	94.74

Tabella 1 – Dati climatici, carichi termici e elementi di ciascun cluster

In Figura 1 sono graficati, a titolo di esempio, alcuni dati di output quali l'andamento della temperatura esterna durante la giornata selezionata del 9 dicembre e il relativo andamento della potenza termica della macchina in funzione delle accensioni.

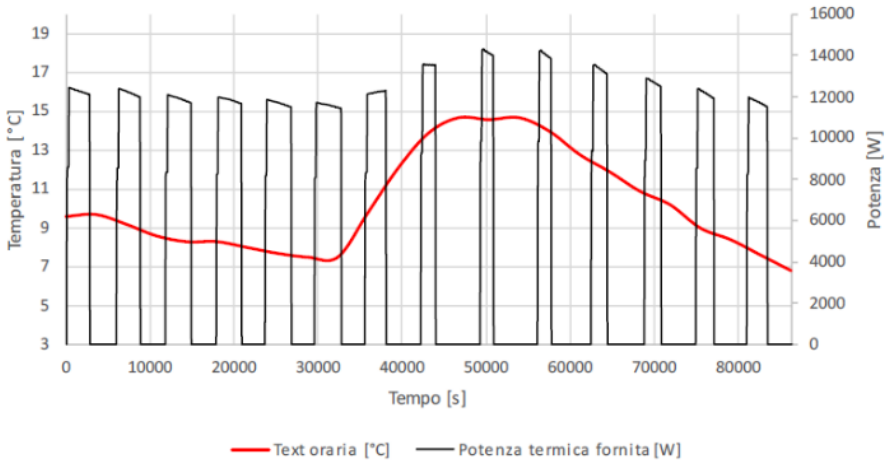

Figura 1 – Andamento orario della temperatura esterna e profilo di potenza termica durante il 9 dicembre

Gli output delle simulazioni dinamiche sono stati utilizzati nello step successivo che ha riguardato la riproduzione dei test sperimentali allo scopo di testare la pompa di calore a doppia sorgente in modalità sia aerotermica che geotermica, con la riproduzione delle accensioni che hanno riguardato le 24 ore di ciascuna delle due giornate tipo.

Ad esempio, per i test sperimentali in regime dinamico sulla pompa di calore dual-source in modalità aria, sono state riprodotte all'interno della camera climatica le condizioni ambientali e di lavoro per la macchina durante due giornate caratteristiche del periodo di riscaldamento invernale simulato. In particolare, sono stati imposti sia i valori di temperatura dell'aria in camera climatica (che rappresenta la temperatura dell'aria esterna della città di Roma durante le due giornate selezionate) per mezzo degli aerotermi interni, sia i valori di temperatura dell'acqua di ritorno in pompa di calore proveniente dal serbatoio d'acqua calda per mezzo della valvola a tre vie sulla linea accumulo caldo - pompa di calore. L'azione di controllo sull'accumulo caldo, al fine di stabilizzare la temperatura in ingresso alla pompa di calore, viene effettuata attraverso il sistema di aerotermi esterni. Per le prove ad aria è stata impostata una differenza di temperatura dell'acqua al condensatore della pompa di calore pari a 5 K (i valori in ingesso

sono dettati dai set-point della simulazione), mentre la portata in ingresso alla macchina lato accumulo caldo è stata mantenuta costante.

I risultati ottenuti dai test sperimentali sulla pompa di calore in modalità ad aria in regime dinamico sono stati confrontati con i corrispettivi risultati ottenuti dalla simulazione numerica tramite ALMABuild, in cui la pompa di calore lavora con dati prestazionali forniti dal costruttore e ottenuti in modalità stazionaria. In Tabella 2 sono riportati i risultati delle prestazioni giornaliere dalla pompa ad aria, con riferimento alla giornata rappresentativa del 9 dicembre, in cui le prestazioni reali sono confrontate con quelle simulate.

Pompa di calore	**Reale**	**Simulata**
Giorni del cluster	127	127
Energia termica erogata [kWh]	104.09 ± 4.55	104.08
Consumo elettrico [kWh]	30.34 ± 0.30	26.25
COP medio giornaliero	3.43 ± 0.18	3.97

Tabella 2 – Confronto tra prestazioni giornaliere reali e prestazioni giornaliere simulate (giorno 9 dicembre)

In Tabella 3 sono confrontate le prestazioni stagionali da test sperimentali con quelle ottenute da simulazione, tenendo conto di tutte le giornate rappresentative ottenute tramite clusterizzazione e dei rispettivi numeri di giorni. Dai risultati ottenuti si evince come la pompa di calore reale presenti un COP medio stagionale (SCOP) inferiore del 12% rispetto a quello che si otterrebbe da simulazione dinamica con curve prestazionali fornite dal costruttore e ottenute in regime stazionario, dimostrando l'importanza del metodo proposto al fine di una stima realistica delle prestazioni stagionali di un generatore termico.

Pompa di calore	**Reale**	**Simulata**
Energia termica erogata [kWh]	16922.28 ± 750.5	16926.12
Consumo elettrico [kWh]	4912.65 ± 50.34	4335.95
SCOP	3.44 ± 0.19	3.90

Tabella 3 – Confronto tra prestazioni stagionali reali e simulate

Campana J.P., Morini G.L., *BESTEST and EN ISO 52016 Benchmarking of ALMABuild, a New Open-Source Simulink Tool for Dynamic Energy Modelling of Buildings*, Energies 12, 2019, 2938.

Dott R., Haller M., Ruschenburg J., Ochs F., Bony J., *The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 Part B: Buildings and Space Heat Load*, 2014.

3 Prodotti attesi

Rapporto tecnico contenente le linee guida per realizzare test sperimentali per valutare le prestazioni stagionali di impianti polivalenti, comprensivo delle caratteristiche che deve possedere un apparato sperimentale di tipo Hardware-in-the-Loop per lo svolgimento di test rapidi in regime dinamico.

4 Prodotti sviluppati

Rapporto tecnico contenente le linee guida per realizzare test sperimentali per valutare le prestazioni stagionali di impianti polivalenti, comprensivo delle caratteristiche che deve possedere un apparato sperimentale di tipo Hardware-in-the-Loop per lo svolgimento di test rapidi in regime dinamico.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si rilevano scostamenti tecnici/economici rispetto al preventivo, né criticità.

6 Sintesi delle attività svolte

L'apparato sperimentale del Laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna è stato impiegato in abbinamento ad un software di simulazione energetica dinamica sulla base dell'approccio Hardware-in-the-Loop (HiL) per sviluppare linee guida per l'esecuzione di test sperimentali rapidi in regime dinamico volti alla valutazione delle prestazioni stagionali di sistemi di riscaldamento polivalenti.
Sono state definite le caratteristiche tecniche necessarie per un apparato di tipo HiL e sono stati definiti metodi di test di prova rapidi tramite la tecnica della clusterizzazione, per la stima delle prestazioni stagionali delle pompe di calore.
La metodologia è stata impiegata per testare una pompa di calore ibrida dual-source aria/terreno. Per mezzo dell'apparato sperimentale, accoppiato all'edificio simulato tramite software, sono state riprodotte specifiche condizioni di lavoro e sono state verificate le prestazioni della pompa di calore in regime dinamico.

7 Dettaglio delle attività svolte

Presso il Laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna è stata sviluppata una metodologia di test basata sull'approccio del tipo Hardware-in-the-Loop (HiL) atta a valutare le prestazioni stagionali di impianti polivalenti, quali pompe di calore a doppia sorgente (aria/terreno), per mezzo di test rapidi di laboratorio. Un impianto Hardware-in-the-Loop è composto da vari sottosistemi, rappresentati schematicamente in Figura 2: camera climatica (CC), che ospita la pompa di calore (HP); circuito idronico lato accumulo caldo (HL); circuito idronico lato sorgente geotermica (ground heat exchanger); sistema di controllo e software di emulazione del comportamento dinamico dell'edificio (BE). Lo schema idraulico del banco di prova sperimentale presente presso il Laboratorio è mostrato in Figura 3.

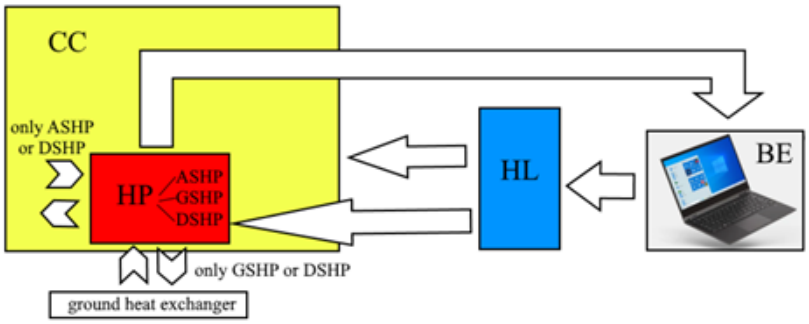

Figura 2 – Schematizzazione sistema HiL

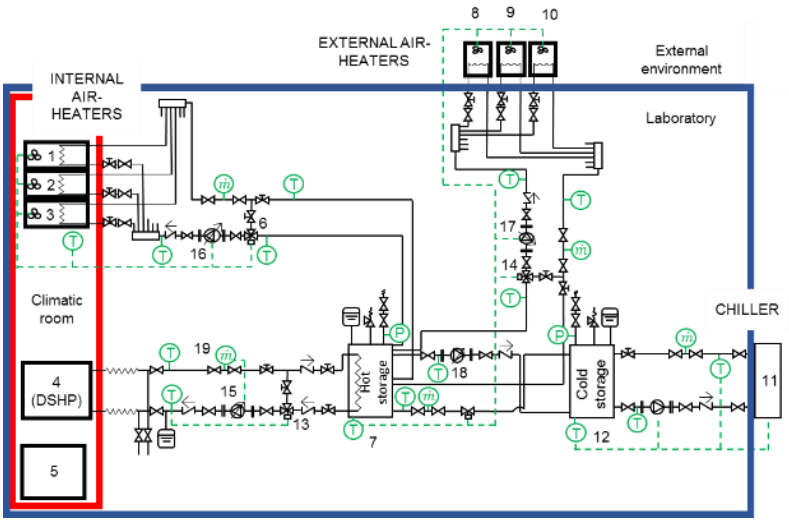

Figura 3 – Schema idraulico del banco di prova sperimentale

La camera climatica (Figura 4) ha volume 78 m^3 e pareti ben isolate. La trasmittanza termica varia tra pareti e soffitto; il coefficiente di trasmissione complessivo della stanza è pari a circa 13 W/K. La camera climatica permette di testare pompe di calore ad aria (ASHP), geotermiche (GSHP) e dual-source (DSHP, in cui i due evaporatori sono accoppiati rispettivamente all'aria della camera e al terreno tramite sonde geotermiche). Quando si testa una ASHP, i valori di temperatura dell'aria esterna richiesti vengono riprodotti all'interno della camera climatica. In una GSHP, invece, la pompa di calore è accoppiata agli scambiatori geotermici verticali esterni, costituiti da quattro sonde verticali (due da 100 m e due da 60 m), con capacità massima di scambio termico di 16 kW.

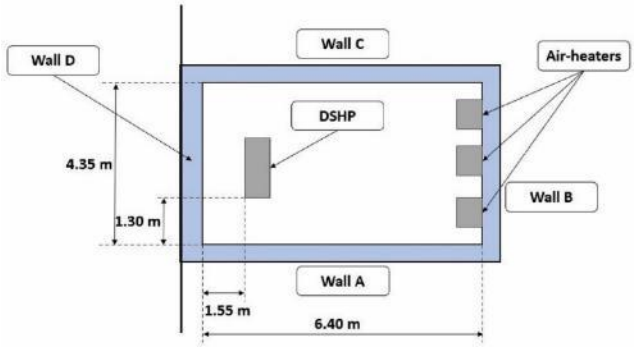

Figura 4 – Schematizzazione camera climatica. Fonte: Dongellini *et al.*, 2024

All'interno della camera climatica sono installati aerotermi per mantenere le condizioni termiche per i test. L'acqua calda prodotta dalla pompa di calore scorre in uno scambiatore di calore a serpentina, posto all'interno dell'accumulo caldo, che separa il fluido (acqua) che scorre all'interno della pompa di calore dall'acqua tecnica che scorre nel resto del circuito. L'accumulo è dotato di una resistenza elettrica che opera come sistema di back-up. Tale accumulo funge da carico durante i test sperimentali, stabilizza il comportamento termico dell'impianto e riduce i cicli di on-off della pompa di calore. Per ridurre la temperatura dell'aria in camera climatica, si regolano la velocità dei ventilatori degli aerotermi e la temperatura dell'acqua negli stessi, dissipando il calore all'esterno tramite ulteriori aerotermi esterni. Quando le condizioni esterne non permettono una dissipazione adeguata, si utilizza un chiller per produrre acqua fredda, immagazzinata in un accumulo freddo collegato a quello caldo tramite un circuito idronico (vedi Figura 3). Il sistema di controllo del circuito idronico utilizza sensori di pressione e temperatura, pompe di circolazione, misuratori di portata e di potenza e valvole di intercettazione. Il sistema di controllo è supportato da un software sviluppato in LabVIEW, che permette di controllare la camera climatica, il circuito idronico e le sonde geotermiche, consentendo di regolare i parametri operativi durante i test, con modalità di controllo manuale o automatica. Il sistema può gestire pompe di calore fino a 12 kW e operare in un intervallo di temperatura esterna tra -5 °C e 40 °C. I dettagli del banco prova e del relativo sistema di controllo sono riportati in (Dongellini *et al.*, 2023). Possono essere testate pompe di calore in diverse modalità operative: aria-acqua (sottraendo calore all'aria della camera climatica tramite la batteria alettata e cedendolo all'acqua del circuito idronico collegato all'accumulo caldo tramite un primo scambiatore a piastre); acqua-acqua (sottraendo calore all'acqua del circuito connesso alle sonde geotermiche tramite il secondo scambiatore a piastre e cedendolo all'acqua del circuito idronico collegato all'accumulo); aria-acqua (sottraendo calore all'aria della camera climatica tramite lo scambiatore a batteria alettata e cedendolo all'acqua del circuito idronico collegato alle sonde geotermiche); acqua-aria (sottraendo calore all'acqua del circuito connesso alle sonde geotermiche e cedendolo all'aria della camera climatica).

Durante i test secondo l'approccio Hardware-in-the-Loop, si emulano le richieste energetiche di un edificio, utilizzando i risultati delle simulazioni numeriche, per generare una "copia digitale" del sistema, riducendo in tal modo il tempo necessario per i test rispetto ai periodi di funzionamento reali. La procedura per lo svolgimento dei test sperimentali in regime dinamico con l'approccio Hardware-in-the-Loop è costituita dalle seguenti fasi:

1. Definizione dell'edificio: si stabiliscono le caratteristiche termofisiche, la destinazione d'uso, il sistema di trasferimento del calore, il tasso di ricambio d'aria, i guadagni interni e le temperature di set-point delle diverse zone termiche;

2. Definizione delle condizioni climatiche: si sceglie la località dell'edificio per determinare le condizioni climatiche di riferimento;

3. Simulazione del fabbisogno energetico: si esegue una simulazione dell'edificio senza alcun sistema impiantistico, per calcolare il fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento;

4. Simulazione dinamica con impianto: l'edificio viene poi accoppiato a un sistema impiantistico, comprensivo di un generatore termico, per soddisfare il fabbisogno energetico e si effettua una simulazione energetica dinamica tramite software;

5. Selezione dei giorni rappresentativi: utilizzando la clusterizzazione, si identificano i giorni più rappresentativi delle stagioni invernale ed estiva per eseguire i test;

6. Esecuzione dei test sperimentali: si utilizzano i dati della simulazione per emulare le condizioni al contorno all'interno del banco di prova, controllato tramite il software in regime dinamico;

7. Calcolo e analisi dei risultati: viene valutata la potenza termica generata, i Coefficiente di Prestazione (COP) e l'efficienza stagionale (SCOP).

Nello specifico, la caratterizzazione del caso studio per il test Hardware-in-the-Loop prevede la selezione della località dell'edificio emulato, che deve rispettare i limiti imposti dalle capacità del banco di prova, ed il caricamento sul software di simulazione dinamica dei relativi dati climatici (temperatura, umidità relativa, radiazione solare diretta e diffusa per ogni superficie esposta). Devono essere inoltre definite le caratteristiche termiche e fisiche dell'edificio emulato, incluse le zone termiche, i volumi, le superfici, le stratigrafie di ogni elemento di involucro, le tipologie di infissi, i ricambi d'aria ecc. Devono essere considerati anche gli apporti termici interni, come quelli generati dalle persone e dalle apparecchiature.

Si procede quindi con la simulazione dinamica dell'edificio senza impianto, per determinare il fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento, impostando le temperature interne di set-point (es. pari a 20 °C, per l'inverno, e 26 °C, per l'estate, nel caso di edifici residenziali). Successivamente, l'edificio viene accoppiato a un sistema impiantistico che include ad esempio una pompa di calore e i terminali. Le mappe prestazionali del generatore vengono inserite nel software per garantire che la simulazione rispecchi il comportamento reale dell'impianto. Gli output ottenuti dal software di simulazione dinamica vengono utilizzati come parametri di setup dall'impianto nel quadro della metodologia HiL. I dati forniti dalla simulazione devono comprendere la potenza termica erogata, la durata e il profilo di accensioni e spegnimento dell'impianto, l'energia erogata e la temperatura dell'acqua in ingresso alla pompa di calore lato utenza. Inoltre, la simulazione fornisce anche altri dati di input utili per i test dinamici sul banco di prova, come le condizioni climatiche della località in termini di temperatura esterna, umidità relativa e radiazione solare diretta e diffusa.

Viene quindi selezionato un numero limitato di giorni rappresentativi delle condizioni stagionali per i test. La selezione delle giornate rappresentative utilizza la tecnica della clusterizzazione, ovvero una tecnica di analisi statistica che permette di selezionare e raggruppare gli elementi che risultano fra loro omogenei all'interno dell'intero insieme dei dati. La suddivisione degli elementi in gruppi, detti clusters, si realizza con una funzione di dissimilarità, con la condizione che gli elementi associati allo stesso cluster siano quanto più simili possibile tra loro e quanto più dissimili possibile da qualunque altro elemento appartenente ad un cluster diverso. La procedura di clusterizzazione può essere affrontata mediante un algoritmo che prende il nome di k-medoids, che propone di trovare una sequenza di k elementi, detti medoids, appartenenti all'insieme dei dati da suddividere in k gruppi o clusters, tali da risultare gli elementi più vicini al centro di massa dei rispettivi clusters. L'algoritmo k-medoids si compone di due fasi principali:

- fase di Build: vengono scelti in maniera casuale o predeterminata i k-medoids;
- fase di Swap: ogni elemento di ciascun cluster viene testato come potenziale nuovo medoid di quel cluster.

Gli elementi della serie devono essere caratterizzati da un numero N di proprietà numeriche in modo da essere descritti da un sistema di N coordinate cartesiane. Per esempio, le variabili selezionate possono essere:

- temperatura esterna;
- carico termico richiesto dall'edificio;
- radiazione solare.

Dato che dal processo di clusterizzazione non tutti i gruppi presentano un numero uguale di elementi, il carico termico annuale richiesto dall'edificio deve essere calcolato in base al peso di ciascun gruppo.

Il procedimento iterativo dell'algoritmo può essere svolto attraverso l'utilizzo di un codice Matlab basato sulla funzione k-medoids e sulla definizione dei dati di input come il numero di clusters, la distanza scelta ed il numero di ripetizioni. In Figura 5 è riportato un esempio di clusterizzazione 3D con dati di input della località di Roma, numero di cluster uguale a 2 e distanza euclidea. I risultati mostrano come le giornate del 9 dicembre e del 7 marzo risultino essere rappresentative di tutto il periodo di riscaldamento.

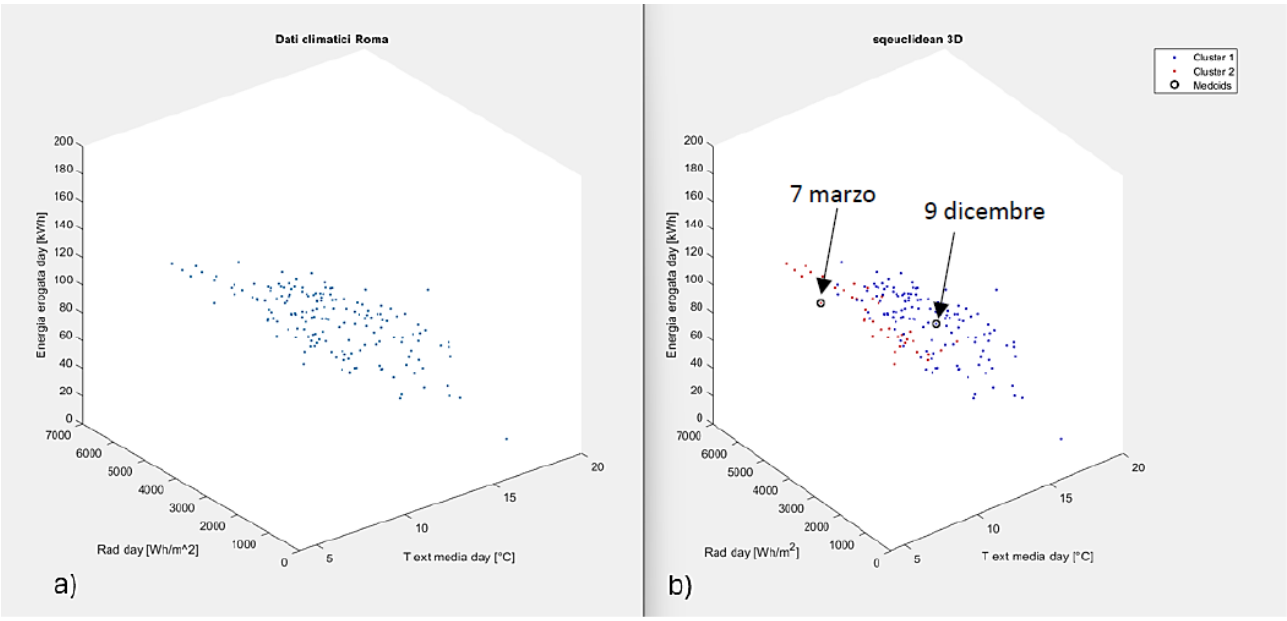

Figura 5 – Esempio di risultati del processo di clusterizzazione 3D attraverso codice Matlab: caratterizzazione dei dati climatici di Roma (a) e individuazione delle giornate rappresentative (b)

Poiché nell'approccio HiL non esiste attualmente alcuna normativa che contenga indicazioni sullo svolgimento dei test dinamici, i criteri proposti per l'esecuzione delle prove sperimentali si pongono l'obiettivo di emulare il carico termico delle giornate rappresentative. Per ogni giornata rappresentativa, il generatore deve operare in modo che:

- l'istante di accensione reale coincida con l'istante di accensione nella simulazione;
- l'energia termica fornita durante ogni accensione reale coincida con quella fornita nella simulazione.

Dalle precedenti considerazioni risulta chiaro che la durata temporale delle accensioni si discosta tra caso reale e simulato. Al fine di riprodurre in modo più simile possibile le accensioni della simulazione, è necessario imporre i valori di alcuni parametri ottenuti dalla simulazione come set-point per i test sull'impianto sperimentale. Tali valori possono essere individuati per esempio nella temperatura dell'acqua in ingresso al condensatore della pompa di calore e/o nella temperatura dell'aria esterna, da imporre per mezzo del sistema di regolazione dinamica PID dell'apparato agendo sul funzionamento dei vari componenti (es. uso degli aerotermi interni alla camera climatica per la riproduzione di un determinato range di temperature dell'aria esterna, attivazione degli aerotermi esterni o della resistenza presente nell'accumulo caldo per stabilizzare la temperatura di ingresso alla pompa di calore).

Attraverso le prove sperimentali viene testato il comportamento del banco di prova accoppiato all'edificio emulato in condizioni dinamiche, mediante la riproduzione del funzionamento del generatore termico nelle giornate più rappresentative del periodo di riscaldamento e/o raffrescamento. L'energia cumulata erogata dalla macchina in laboratorio viene confrontata con l'energia erogata nella simulazione nel corrispondente periodo di accensione: nel momento in cui si ottiene l'uguaglianza fra i due valori, viene interrotto il funzionamento dell'impianto sperimentale.

Una volta terminate le prove di laboratorio si passa alla determinazione delle prestazioni dell'impianto. Nel caso di una pompa di calore, viene calcolato l'indice di prestazione COP istantaneo, dato dal rapporto tra l'effetto utile della pompa di calore (cioè la potenza erogata

dalla macchina lato condensatore) e la potenza elettrica richiesta dal compressore. Per valutare la performance stagionale della macchina, viene impiegato l'indice di prestazione SCOP (Seasonal Coefficient of Performance), il quale rappresenta il rapporto fra l'energia termica erogata dalla pompa di calore e la corrispondente energia elettrica consumata durante l'intero periodo di funzionamento stagionale. Per il calcolo dell'SCOP, si considera l'energia termica complessiva erogata dalla pompa di calore durante il test di una giornata rappresentativa e si moltiplica tale valore per il numero di giorni che appartengono al rispettivo cluster. Lo stesso processo va eseguito per ogni giornata rappresentativa individuata dal metodo di clusterizzazione. La somma di tali prodotti rappresenta il numeratore dell'SCOP. Per il calcolo dell'energia elettrica complessiva si procede analogamente, ottenendo il denominatore dell'SCOP. Il rapporto fra i due valori così ottenuti permette la stima delle prestazioni stagionali del generatore tramite metodo HiL.

Il metodo proposto è stato applicato alla pompa di calore dual-source presente in Laboratorio, ottenendo i risultati presentati nella Sezione 2 del presente documento.

Dongellini M., Ballerini V., Morini G.L., Naldi C., Pulvirenti B., Rossi di Schio E., Valdiserri P., *A new climate chamber for air-source and ground-source heat pump testing based on the Hardware-in-the Loop approach: Design and cross validation*, Journal of Building Engineering 64, 2023, 105661.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze all'interno della LA.

9 Pubblicazioni scientifiche

Dongellini M., Natale C., Naldi C., Morini G.L., *Design of a new test bench based on the Hardware-in-the Loop methodology for dynamic performance testing of hydronic heat pumps*, Atti della 40th UIT Heat Transfer Conference, 26-28 giugno 2023, Assisi.

Dongellini M., Naldi C., Moser C., Varga S., Soares J., Morini G.L., *Seasonal energy performance assessment of a hybrid HVAC system driven by solar and biomass energy for space heating and cooling in residential buildings*, Journal of Physics: Conference Series 2766, 2024, n° 012100https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2766/1/012100.

Ballerini V., Natale C., Dongellini M., Naldi C., Rossi di Schio E., Valdiserri P., Pulvirenti B., Morini G.L., *Apparato sperimentale per l'analisi delle prestazioni energetiche di pompe di calore*, AICARR Journal 88, 2024, pag. 56-64.

Camponeschi C., Goni M., Cioffi F., Dongellini M., Naldi C., Morini G.L., Germano L., Genovese F., Cervellati A., Casolari A., Corsaro F., Ciancamerla M., Ballotta L., *Potential energy savings of the refurbishment of a university building's heating system with a R290 air-to-water heat pump*, Atti della 41st UIT Heat Transfer Conference, 19-21 giugno 2024, Napoli.

10 Eventi di disseminazione

Presentazione dell'articolo *Design of a new test bench based on the Hardware-in-the Loop methodology for dynamic performance testing of hydronic heat pumps* presso 40th UIT Heat Transfer Conference, 26-28 giugno 2023, Assisi.

Presentazione dell'articolo *Seasonal energy performance assessment of a hybrid HVAC system driven by solar and biomass energy for space heating and cooling in residential buildings* presso 9th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm 2024), 10-13 giugno 2024, Bled (Slovenia).

Presentazione dell'articolo *Potential energy savings of the refurbishment of a university building's heating system with a R290 air-to-water heat pump* presso 41st UIT Heat Transfer Conference, 19-21 giugno 2024, Napoli.